

# Материалы для фотоники

- Светоизлучающие элементы (СИЭ)
- Оптоволокно
- Фотонные кристаллы

*(часть материала предоставлена А.Тихоновым (Химфак МГУ) и  
А.Синицким (ФНМ))*

# Светодиоды



(Light Emitting Device, LED) -  
1962, "Дженерал электрик"  
1968 - начало использования  
1985 - сигнальные указатели  
1993 - LED голубого света

*Фонтан "Похищение  
Европы", Москва  
(площадь Киевского  
вокзала) - 2000 гг.*

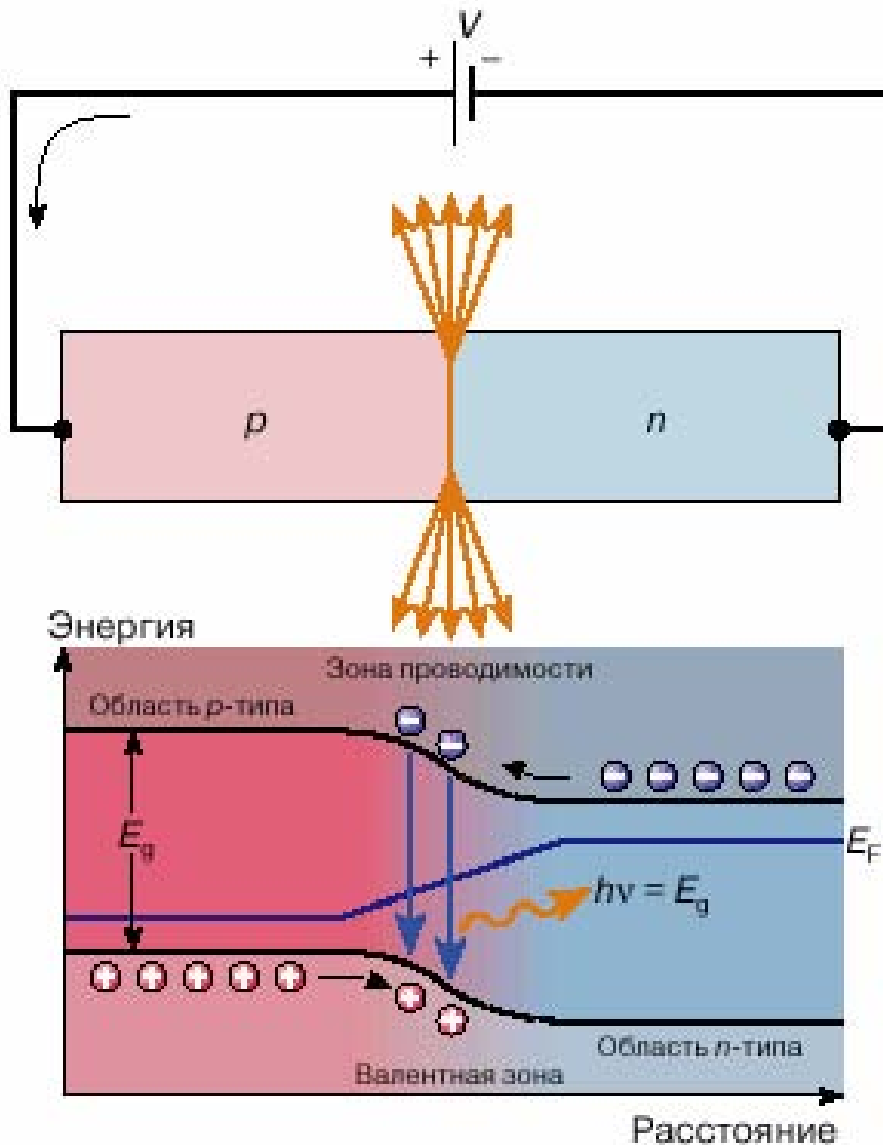


# Преимущества СИЭ

- миниатюрность
- значительное время эксплуатации (10000 ч.)
- малое потребление энергии
- высокий квантовый выход
- не требуют водяного охлаждения
- излучение в любой области (видимого) спектра
- излучение близко к монохроматическому

$$\text{к.п.д.} = \frac{\text{число эмиттированных квантов света}}{\text{число инжектированных неосновных носителей}}$$

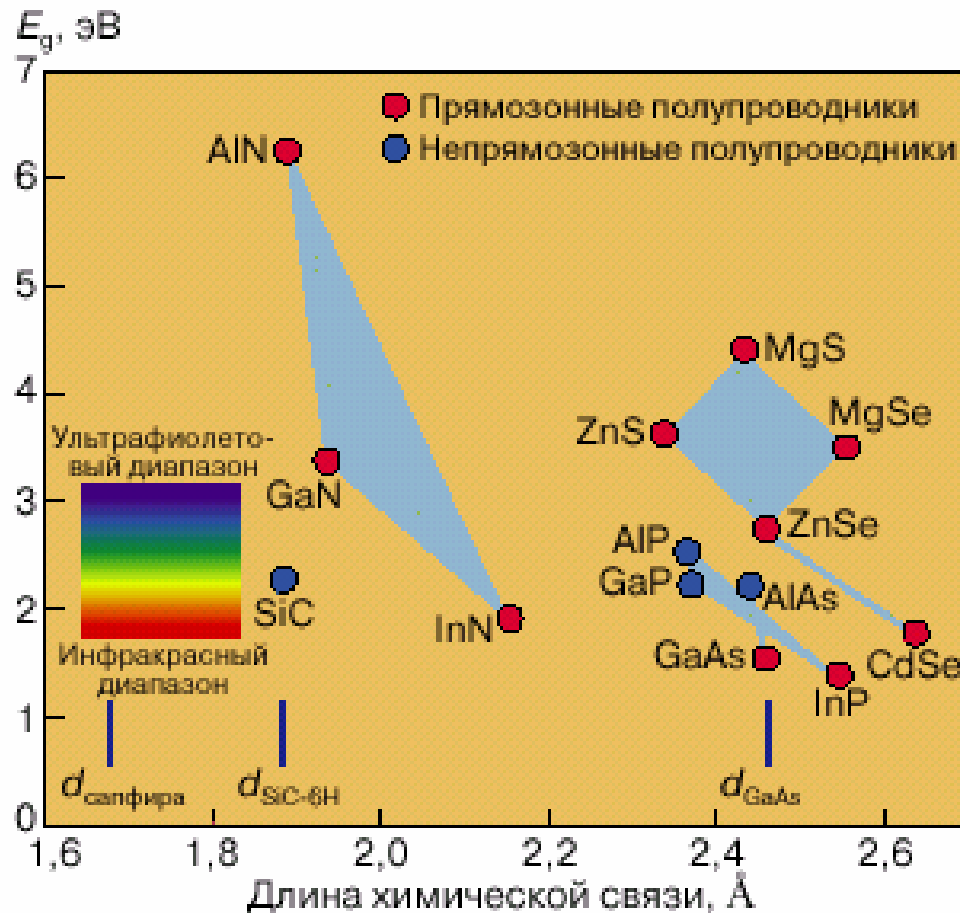
# Принцип действия



Основа СИД - активный слой, включающий электронно-дырочный переход с шириной запрещенной зоны  $E_g$  и заключённый между полупроводниками n- и p- типа и омическими контактами. Когда ток протекает в прямом направлении, электроны проходят через переход со стороны n-полупроводника, а дырки со стороны p-полупроводника, в результате чего в области p-n - перехода происходит излучательная рекомбинация с образованием фотонов с энергией  $h\nu \approx E_g$  (прямозонные полупроводники: дно зоны проводимости и потолок валентной зоны расположены при одном значении волнового вектора).

*Схема и энергетическая диаграмма n/p светоизлучающего диода (СИД).  $E_F$  – уровень Ферми.*

# Ширина запрещенной зоны СИЭ



Первые светодиоды - красная и инфракрасная области спектра (GaAs, AlGaAs).

Первые зеленые светодиоды - GaP, синие - SiC.

(*непрямая зонная структура* → *излучение слабой интенсивности*)

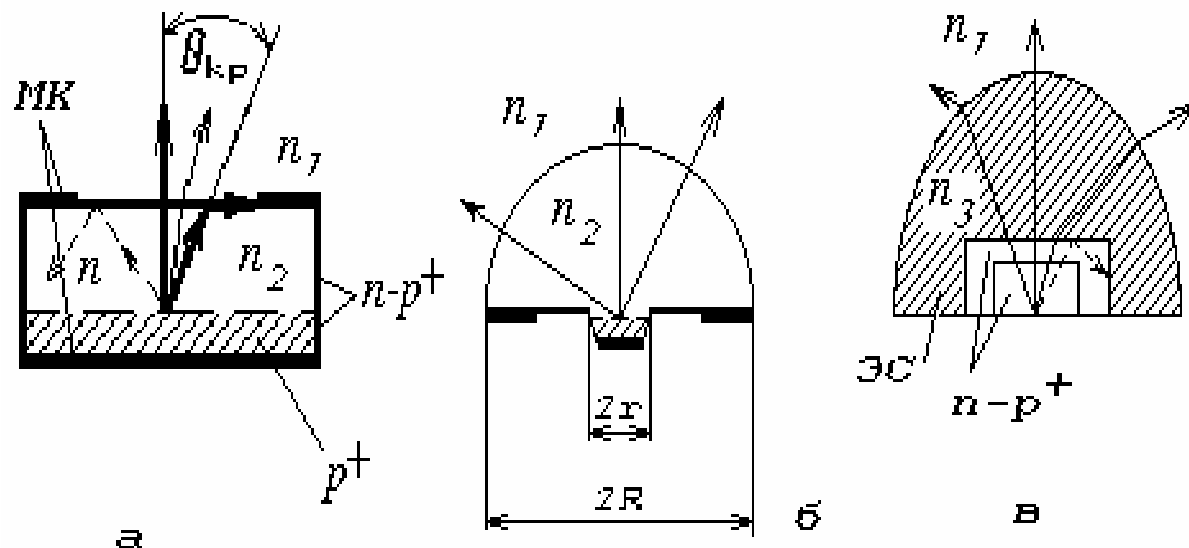
$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ :  $x=0.39$  ( $\lambda=660$  нм),  
 $x=0,5...0,75$  ( $\lambda=610$  нм).

$\lambda[\text{нм}] = 1234/e$ ,

$e$  - ширина запр. зоны

СИЭ в видимой области спектра - ширина запрещенной зоны  $>2$  эВ

# Устройство «светодиода»



*Конструкция световылучающей части светодиодов:*

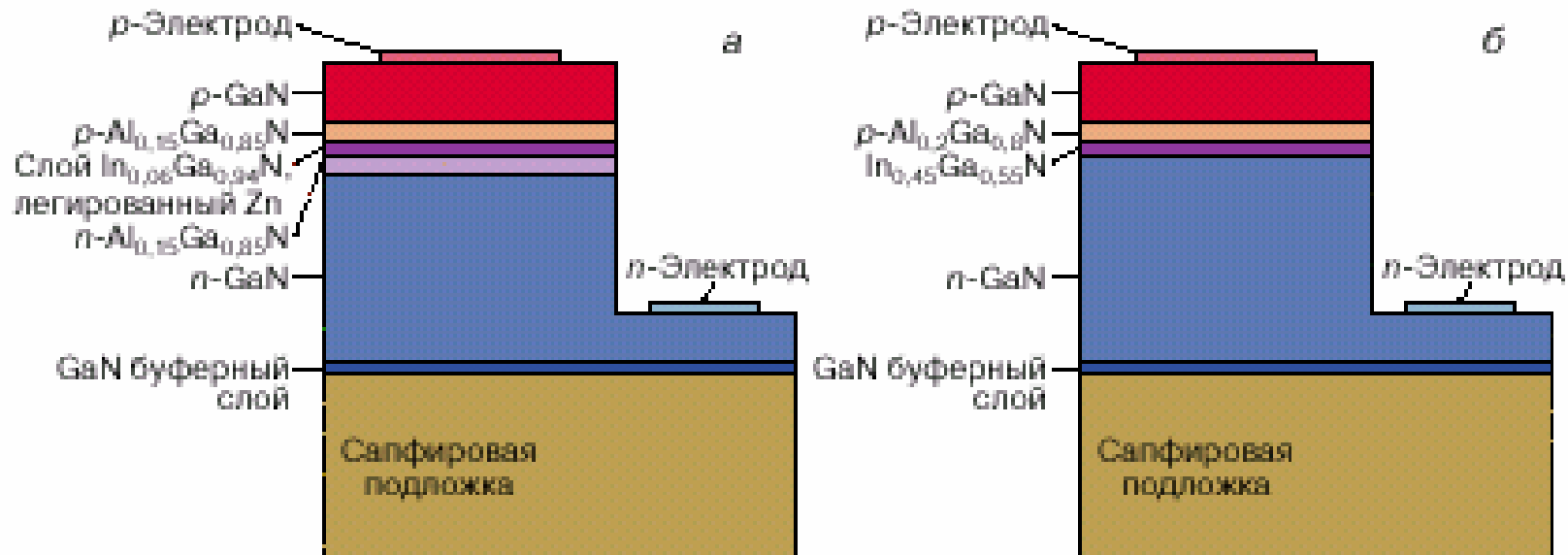
*а – плоская, б – полусферическая, в – с линзой из эпоксидной смолы; МК – металлический контакт, ЭС – эпоксидная смола; n-p+ - излучающий переход.*

Плоская конструкция: из кристалла выходят лучи, составляющие с нормалью угол  $\Theta = \arcsin(n_1/n_2)$  (конус  $35^\circ$  для арсенида и фосфида галлия).

Полусферическая конструкция:  $R/r = (n_2/n_1)$ , эффективность на порядок превышает эффективность плоской конструкции.

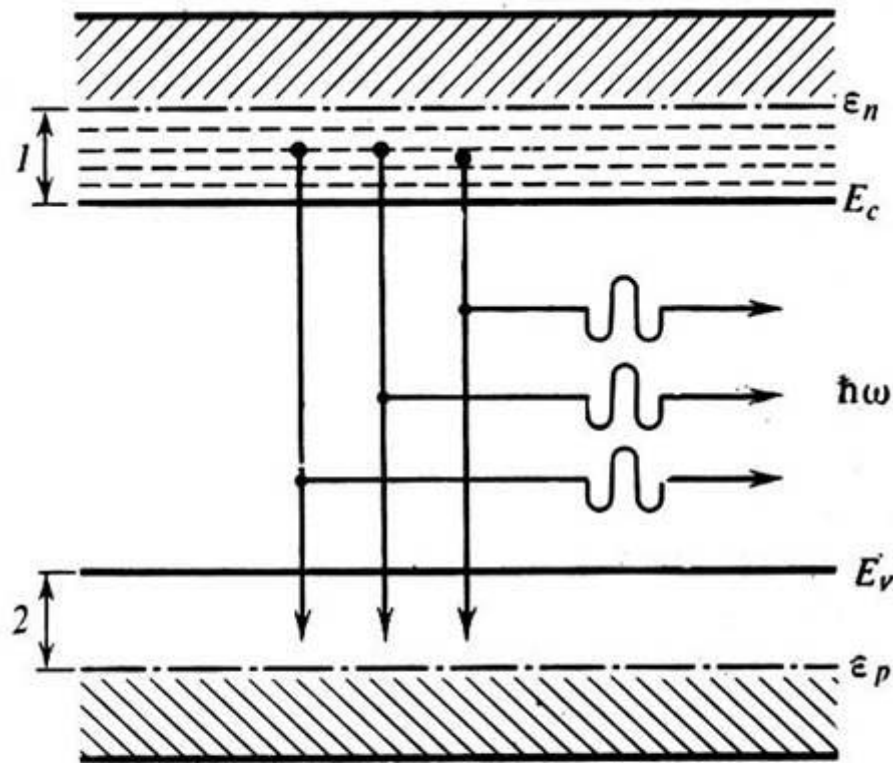
# Нитриды А<sup>III</sup>-В<sup>V</sup>

Нитриды AlN, GaN, InN и их сплавы - широкозонные полупроводники с прямыми оптическими переходами, наиболее перспективные материалы для изготовления свето- и лазерных диодов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой (240-620 нм) областях спектра.



Слоистые структуры, используемые для изготовления светодиодов: а — светодиод с двойной гетероструктурой; б — зелёный светодиод

# П/п лазеры



Межзонная инверсная заселенность уровней в полупроводниковом кристалле

$\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_p$  — квазиуровни Ферми электронов и дырок;  
1 и 2 — области занятых и свободных состояний соответственно

Получение стимулированного излучения возможно лишь при достижении инверсной заселенности уровней (отрицательная температура):

- нарушение внутризонного равновесия (перевод электронов из нижней части зоны проводимости в верхнюю, рекомбинация за  $10^{-13}$  с)
- нарушение межзонного равновесия (перевод электронов в валентную зону, рекомбинация за  $10^{-3} - 10^{-9}$  с)

Накачки:

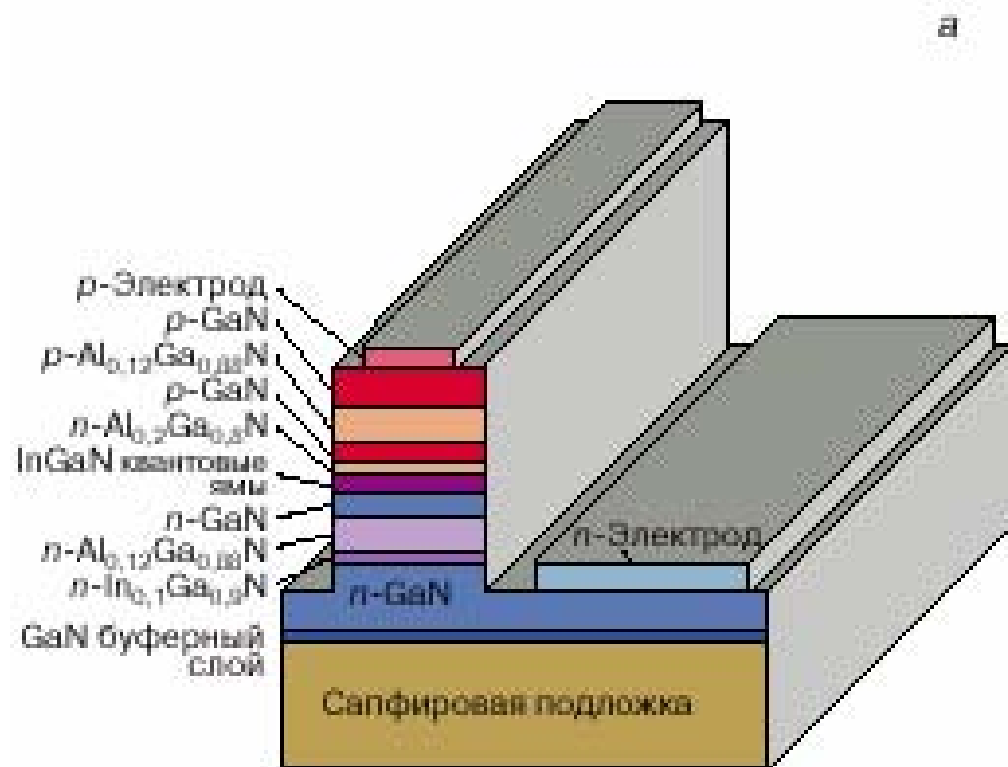
- оптическая,
- электронно-лучевая,
- инжекция электронов и дырок через р-п-переход (при приложении напряжения, снимающего потенциальный барьер перехода электронов между донорной и акцепторной частями, GaAs, InAs, InSb). Рекомбинация сопровождается интенсивным излучением фотонов.

Ж.Алферов (Иоффе ФТИ) –  
Нобелевская премия 2001

Лекция new1. Фотоника



# Лазер

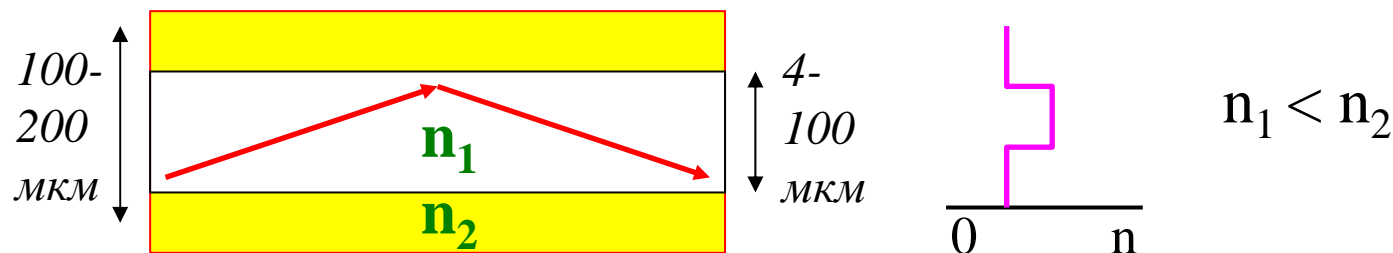


В лазерных диодах должны быть реализованы односторонняя инжекция, волноводный эффект и положительная обратная связь: а – структура инжекционного лазера (InGaN); б – излучение голубого лазерного диода в импульсном режиме

# Оптические волокна

**Состав:** сердцевина- «проводник» фотонов и оболочка – отражатель фотонов (волокна на основе  $\text{SiO}_2$ , потери до 0.2 дБ/км, полоса пропускания до 100 ГГц/км).

**Применение:** передача информации на большие расстояния (телефон, ТВ, Интернет), оптоэлектроника, передача световой энергии (лазерная техника, световоды).



**Получение:** химическое осаждение из газовой фазы внутри стеклянных трубок (капилляров),  $\text{SiCl}_4 + \text{CF}_4 + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 + \dots$  (1500-1700°C, 1 слой),  $\text{SiCl}_4 + \text{GeCl}_4$  (1500-1700°C, 2 слой), схлопывание (~2000°C), протяжка, прокатка (получение волокна), формирование из оптоволокна оптических кабелей.

# Фотонные кристаллы

**Фотонные кристаллы** (photonic crystals) – материалы с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Будучи прозрачными для широкого спектра электромагнитного излучения, фотонные кристаллы не пропускают свет с длиной волны, сравнимой с периодом структуры фотонного кристалла, вследствие брэгговской дифракции. Эти спектральные диапазоны получили название “**фотонные запрещенные зоны**” (photonic band gap, PBG). Фотонные кристаллы – **оптические аналоги электронных полупроводников**.

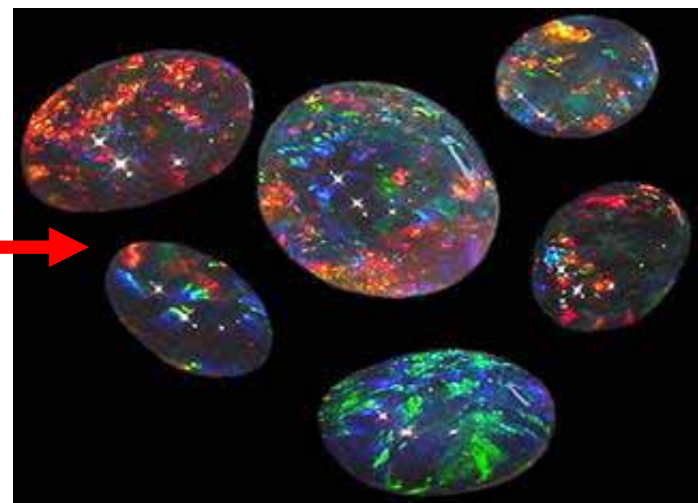
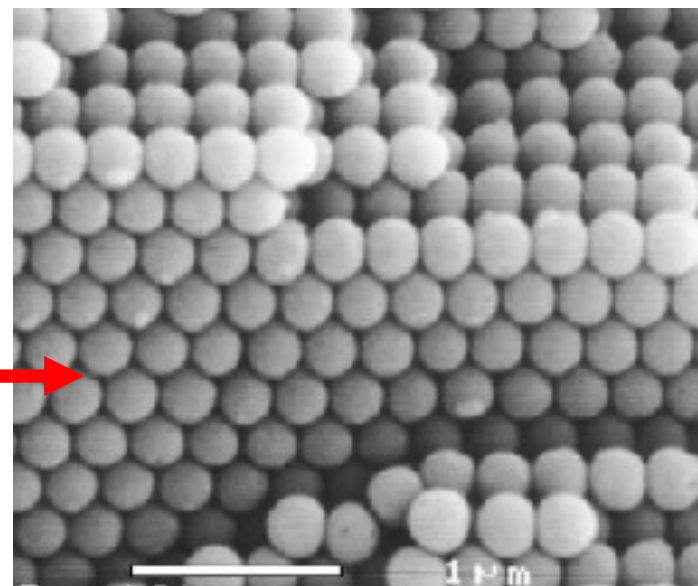
E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58** 2059-2062 (1987).

S. John, Phys. Rev. Lett. **58** 2486-2489 (1987).

# Опалы

Одними из первых материалов, которые стали рассматриваться в качестве фотонных кристаллов, были **синтетические опалы**. Опалы образованы монодисперсными сферическими частицами  $\text{SiO}_2$  ( $d = 150\text{--}900$  нм), упорядоченными в плотнейшей шаровой упаковке. Периодичность структуры опала в масштабе, сопоставимом с длиной волны видимого света, является причиной **иризации** — необычной игры света, связанной с дифракцией.

A. Zakhidov et al., Science **282** 897-901 (1998).



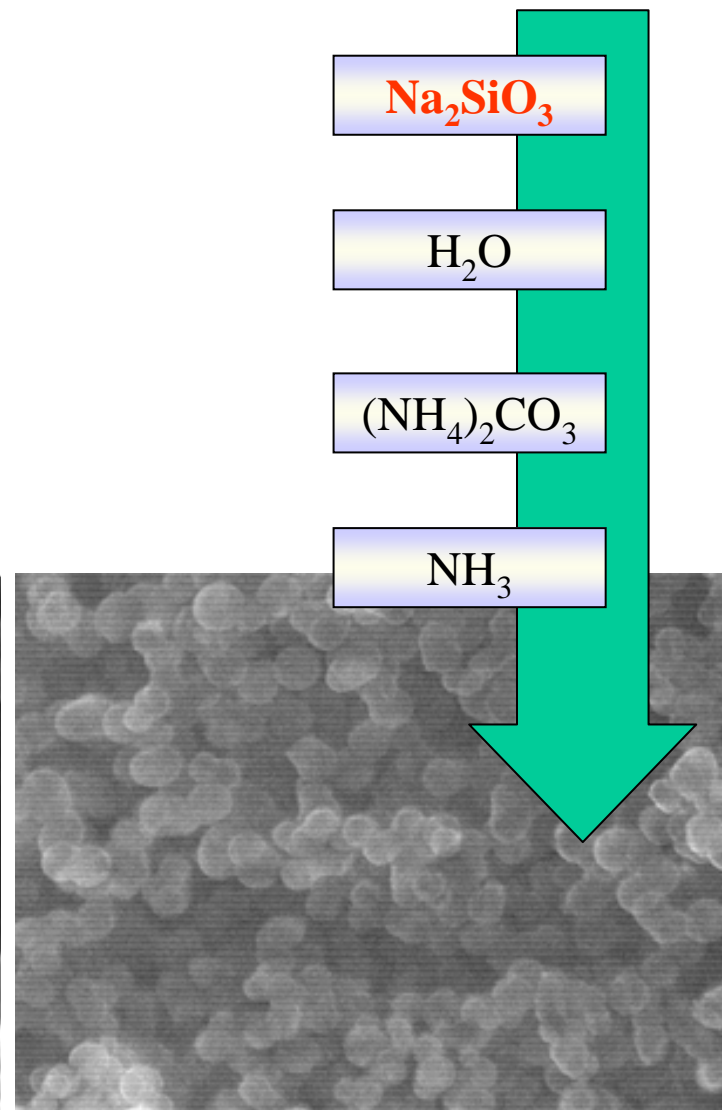
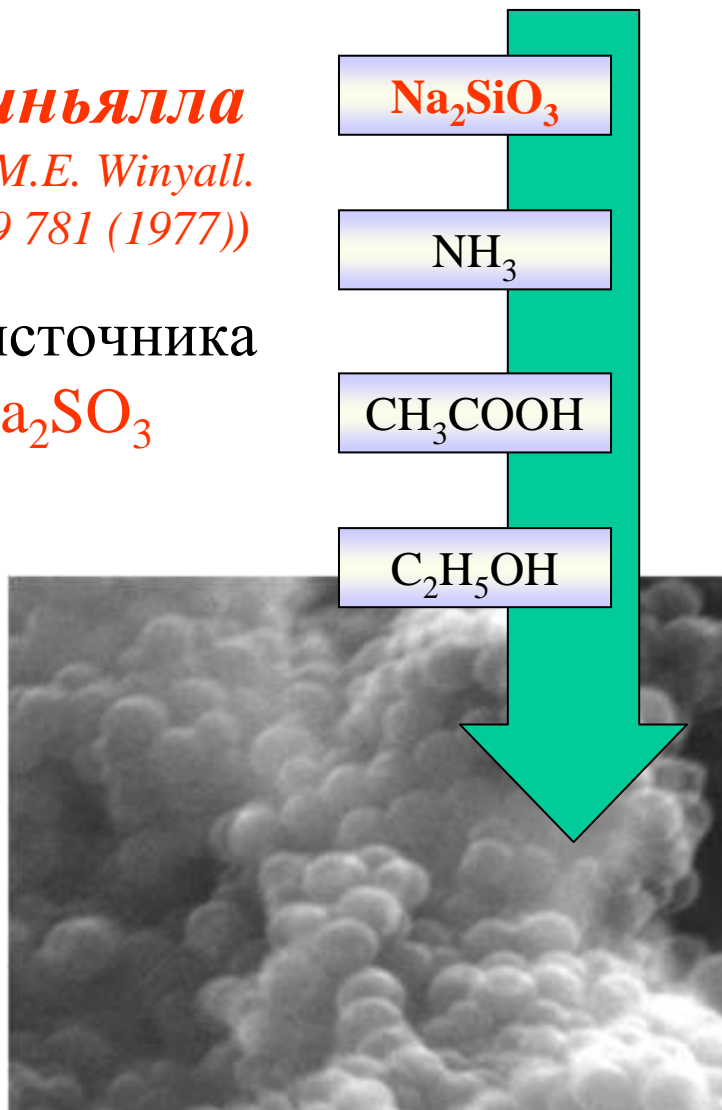
# Микросферы $\text{SiO}_2$

## *Метод Виньялла*

*(E.G. Acker and M.E. Winyall.  
U.S. Patent 4 049 781 (1977))*

В качестве источника  
 $\text{SiO}_2$  –  $\text{Na}_2\text{SO}_3$

Частицы  
поли-  
дисперсны  
и сильно  
агрегиро-  
ваны



# Монодисперсные микросферы

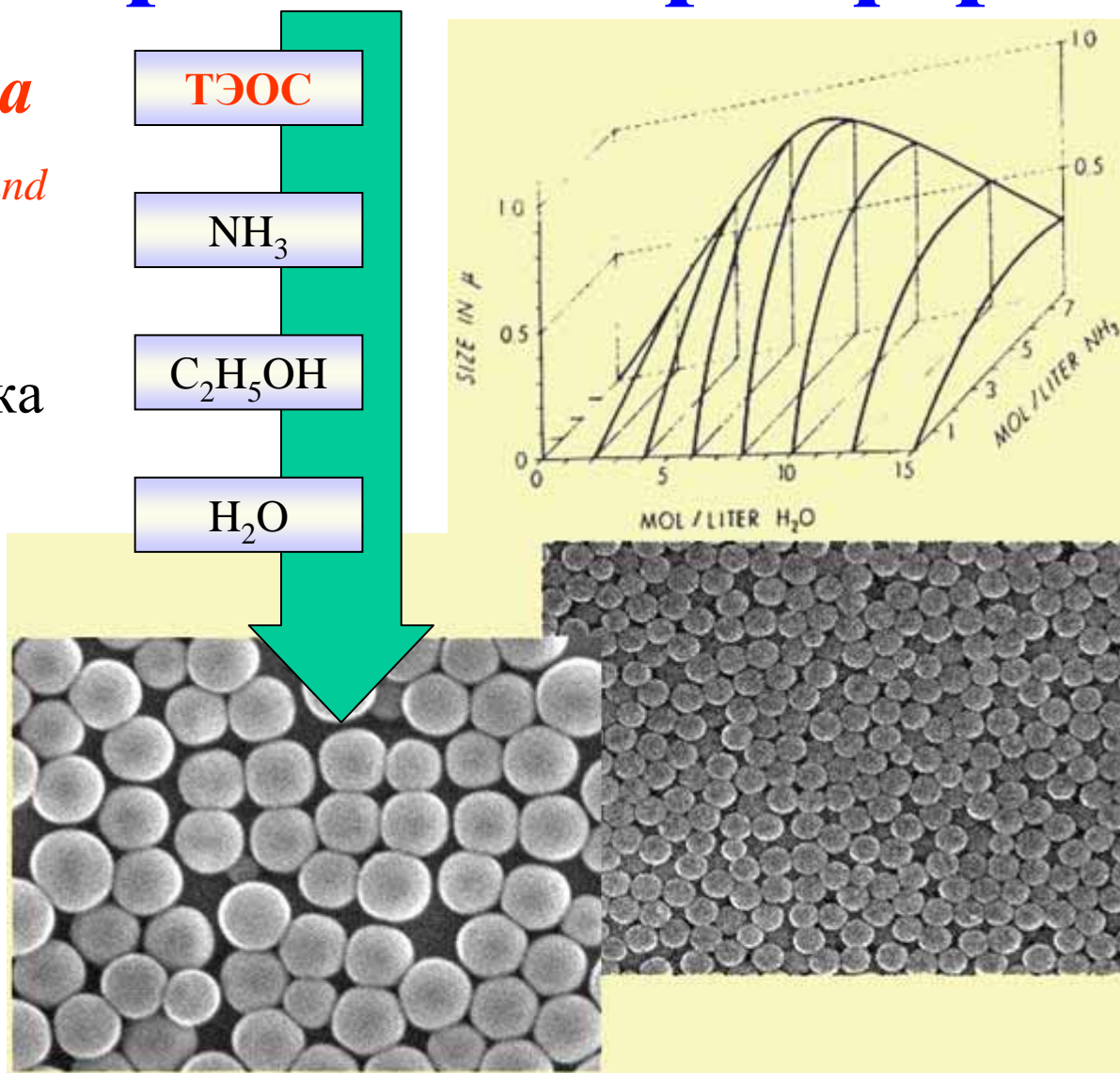
## Метод Штебера

(W. Stöber et al. *J. Colloid and Interface Sci.*, **26**, 62-69 (1968).)

В качестве источника

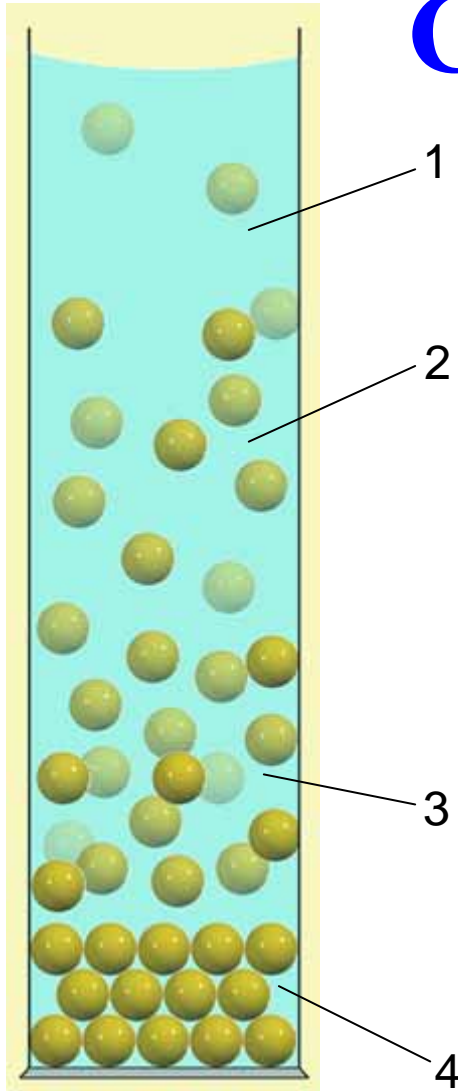


Метод Штебера  
предпочтитель-  
нее ввиду  
экспрессности и  
монодисперс-  
ности частиц

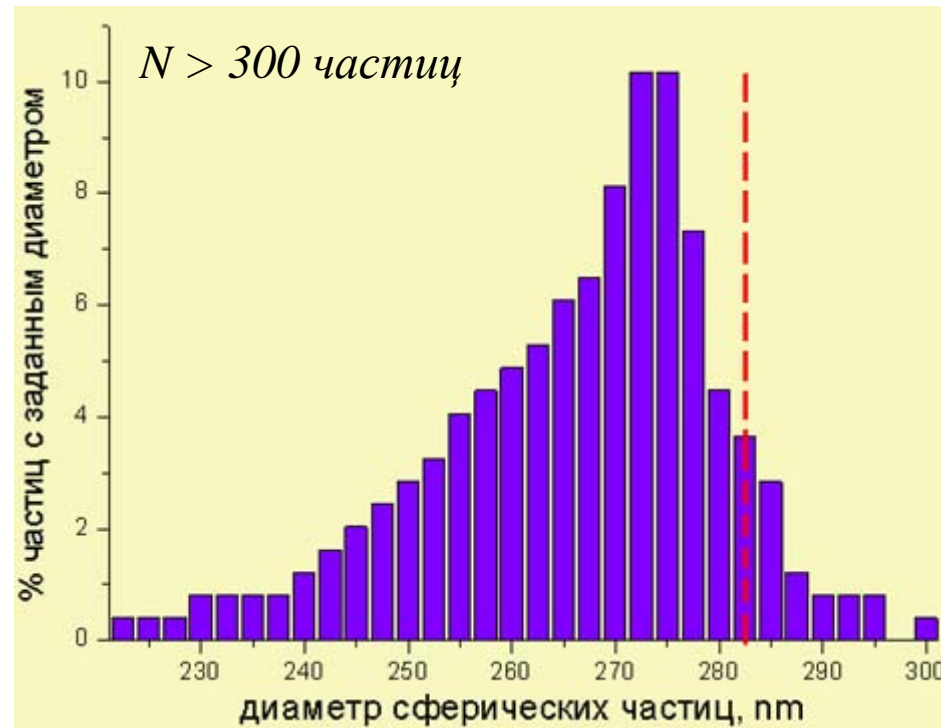




# Седиментация (сепарирование)



- 1 – осветленная зона
- 2 – зона свободного осаждения
- 3 – зона стесненного осаждения
- 4 – осадок



$$F_A = \frac{1}{6} \pi \rho_{жс} g a^3$$

$$F_c = 3 \pi \mu V a$$

$$F_T = \frac{1}{6} \pi \rho_{SiO_2} g a^3$$

Для области 2 (закон Стокса):

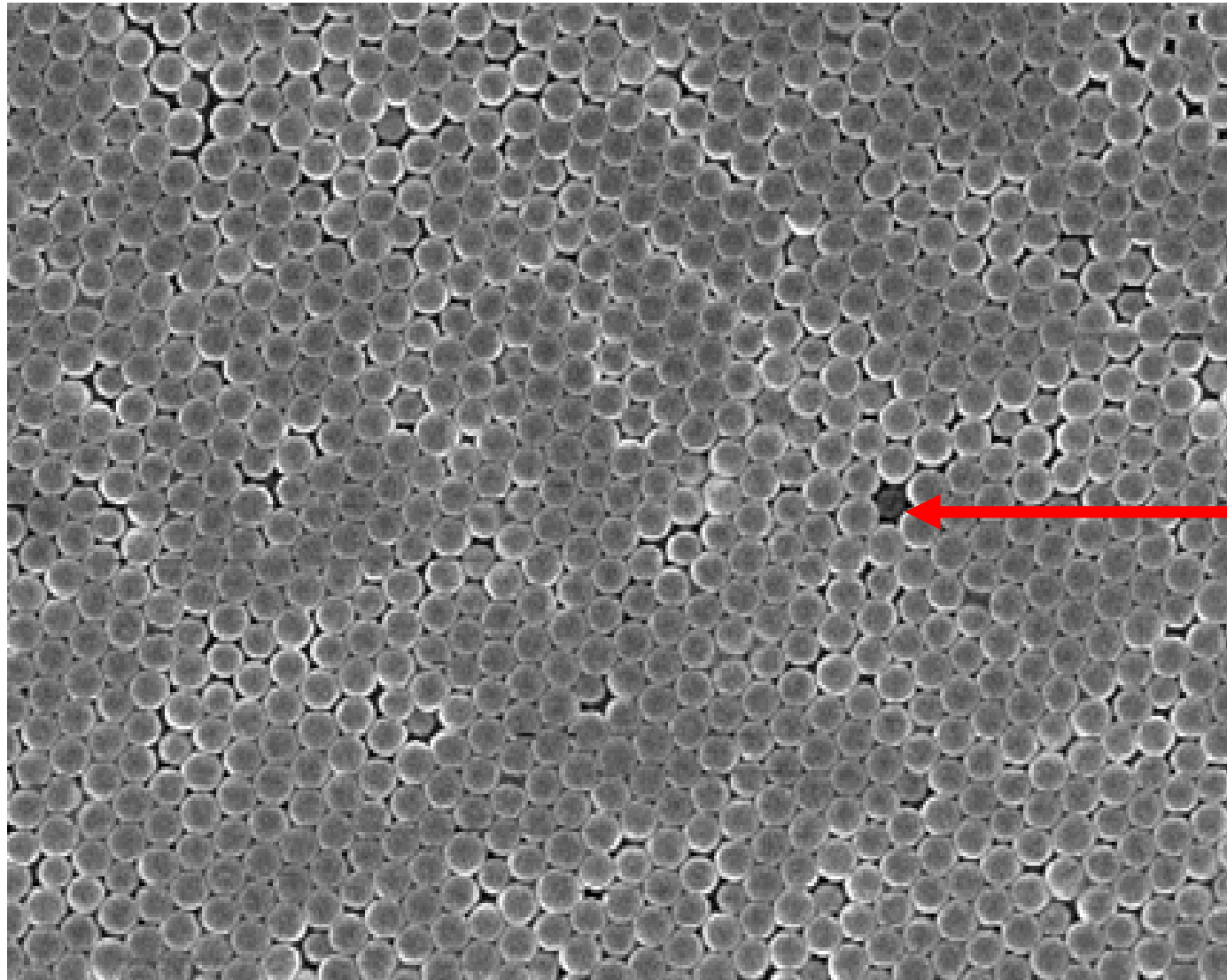
$$V = \frac{(\rho_{SiO_2} - \rho_{жс}) g a^2}{18 \mu}$$

**Скорость осаждения  
микрофер**

Лекция new1. Фотоника

**250-400 нм - 2,3-7,7 мм/сут**

# "Самоукладка" микросфер $\text{SiO}_2$



дефекты,  
границы  
блоков и пр.



# Лабораторные опалы



Лекция new1. Фотоника

# Упорядоченные пленки



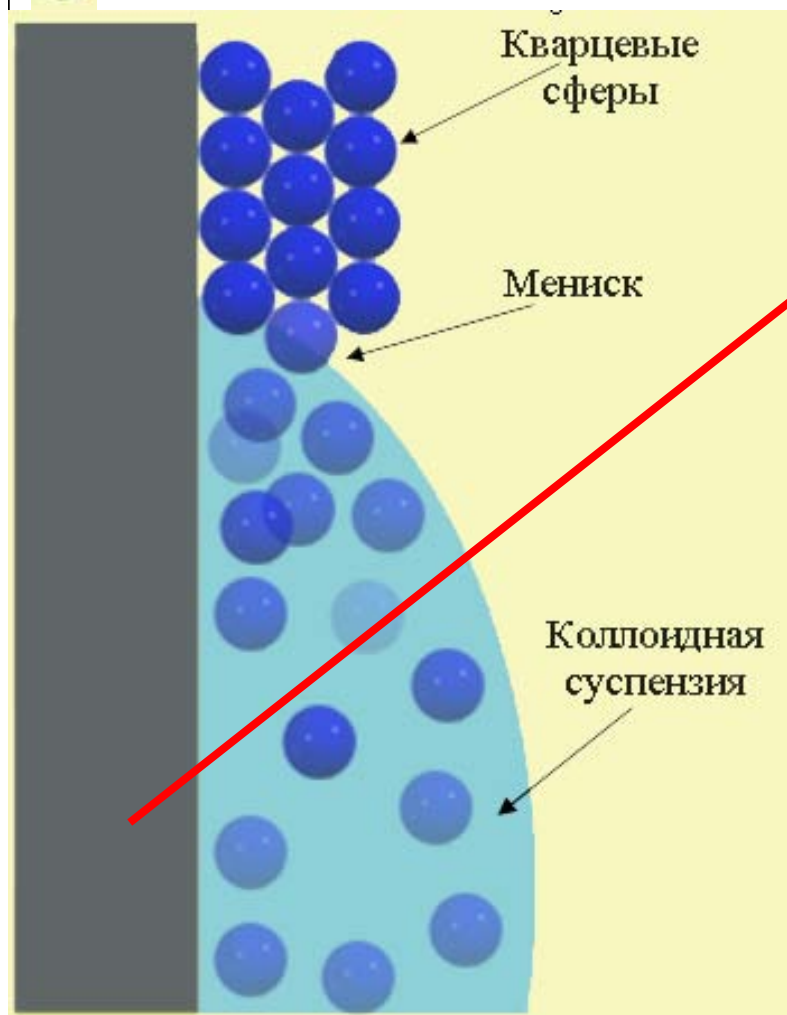
Естественная седиментация



Центрифугирование



Осаждение на вертикальную подложку:



Подложка:

Al

$\text{Al}_2\text{O}_3$

Стекло

Cu

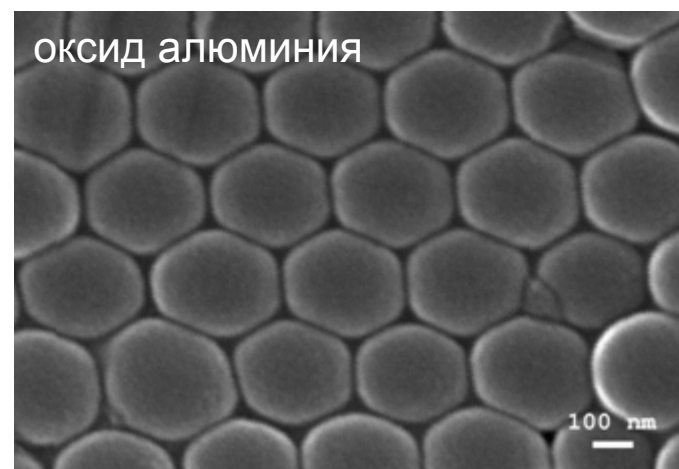
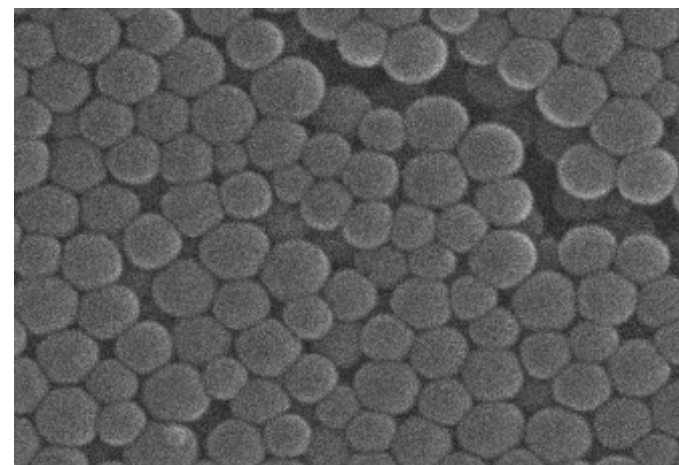
Pb

*Отжиг  
синтезированных  
опалов приводит к  
упрочнению  
материала и к  
улучшению его  
оптических свойств.*

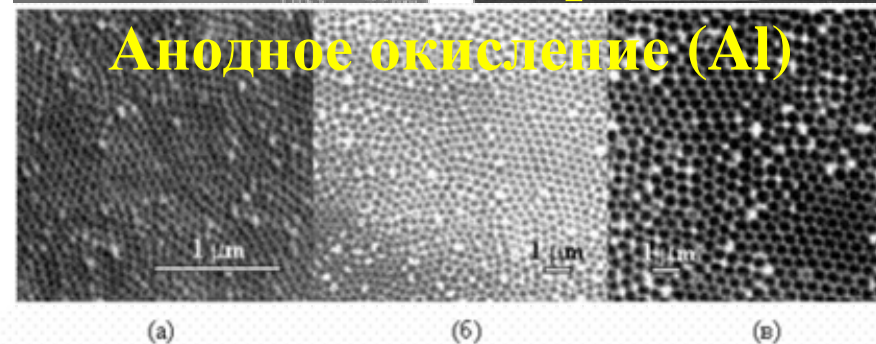
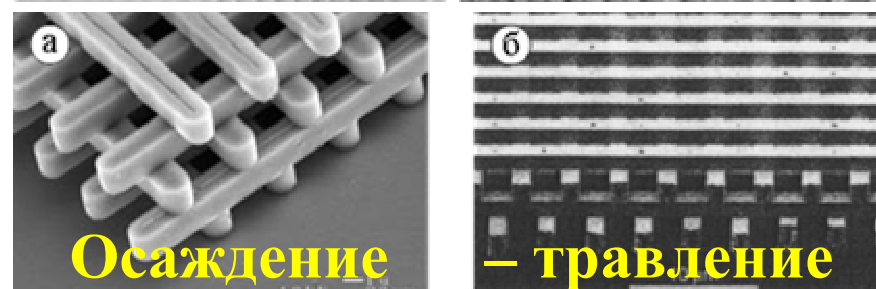
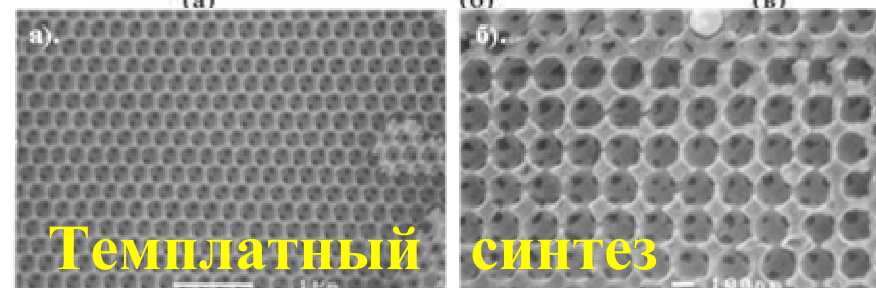
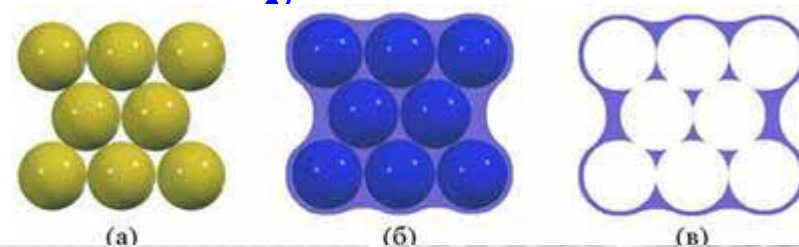
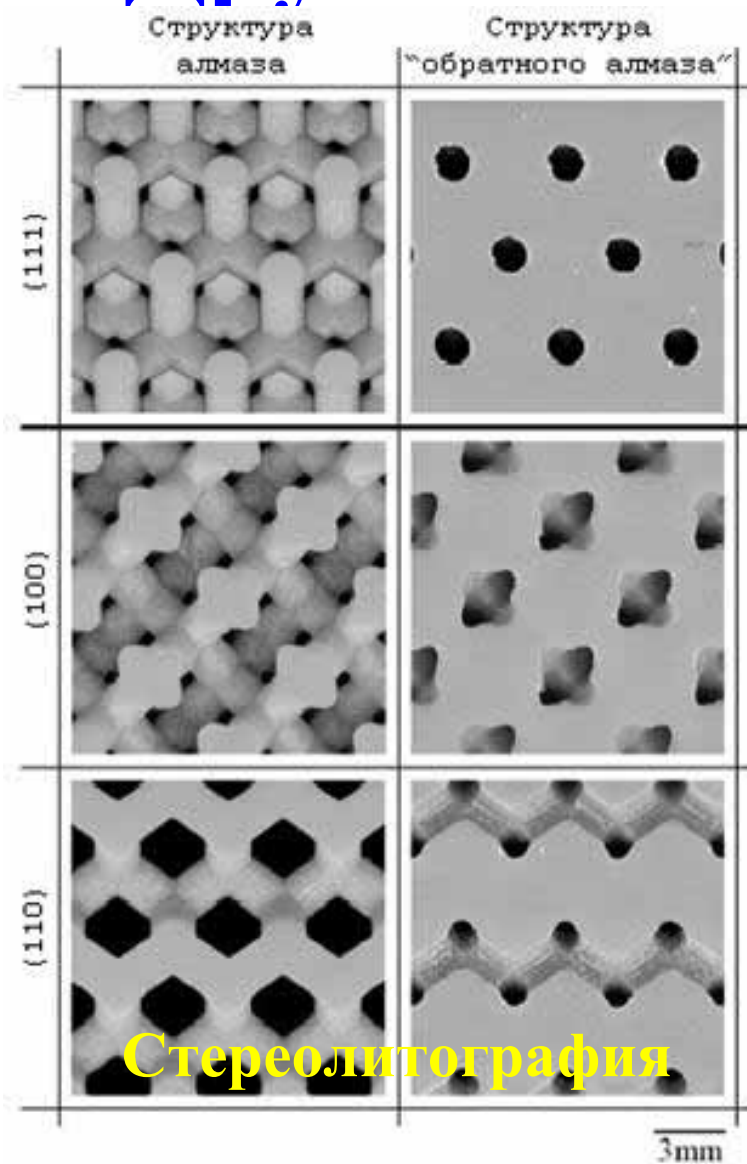
(200 °C, 10 ч) +

(700 °C, 10 ч)

Лекция new1. Фотоника

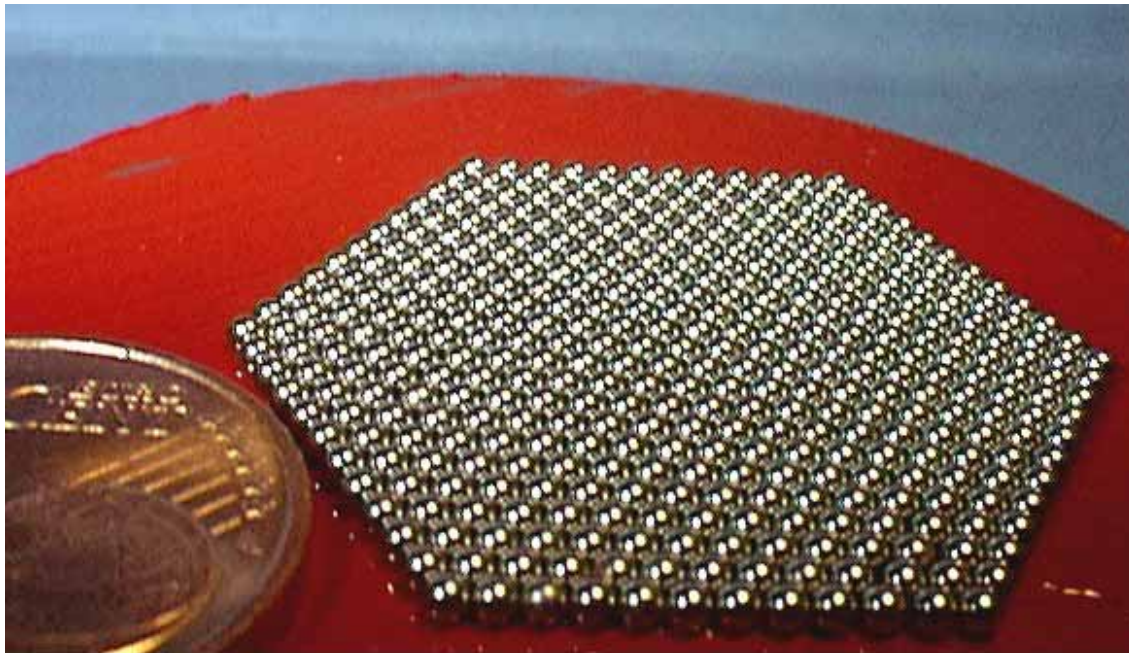


# Другие методы получения

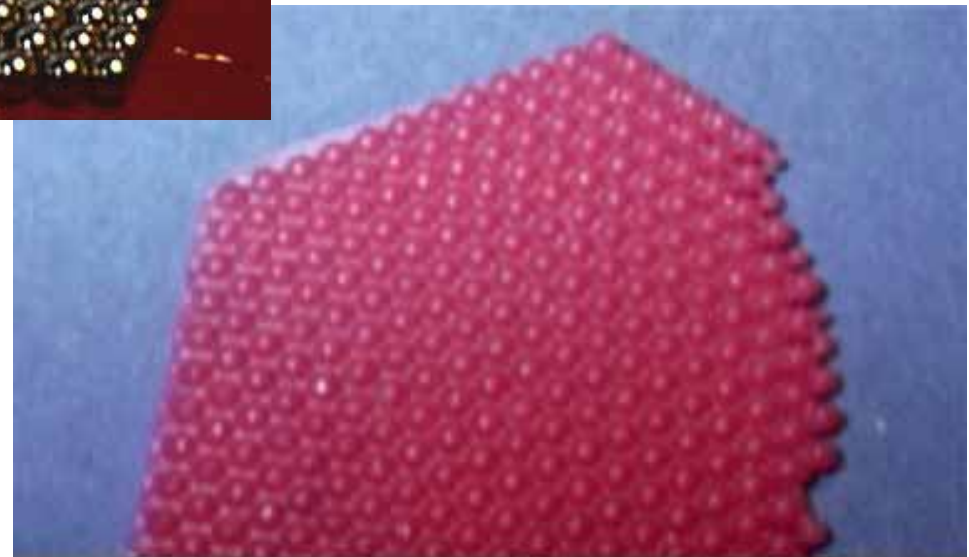




# "Акустические" кристаллы

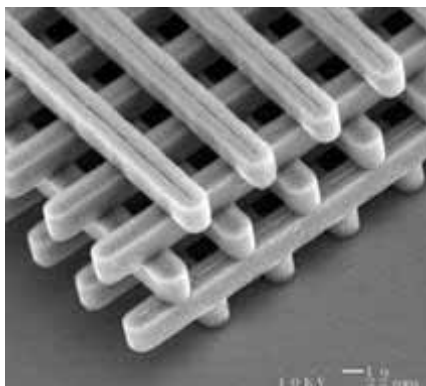


Размер металлического шарика или восковой сферы сопоставим с длиной звуковой волны

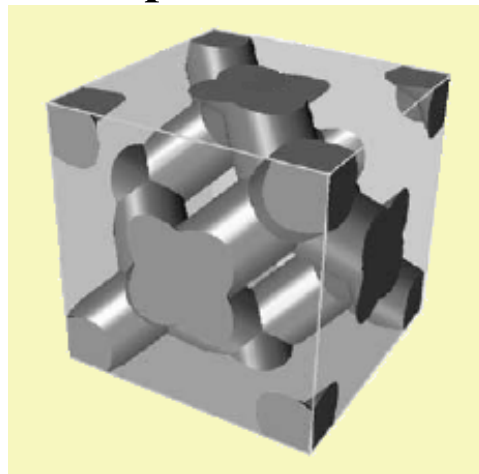


# Типы "решеток"

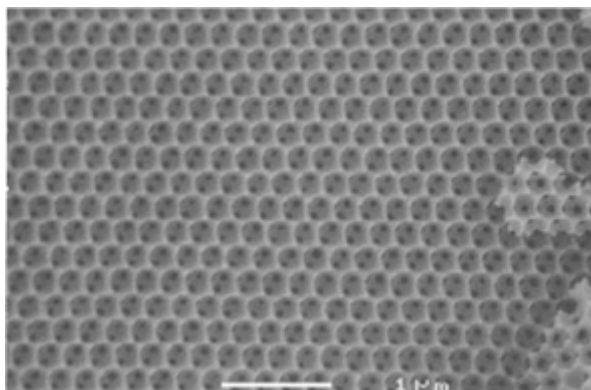
Основные типы фотонных кристаллов:



“дровяная поленница”

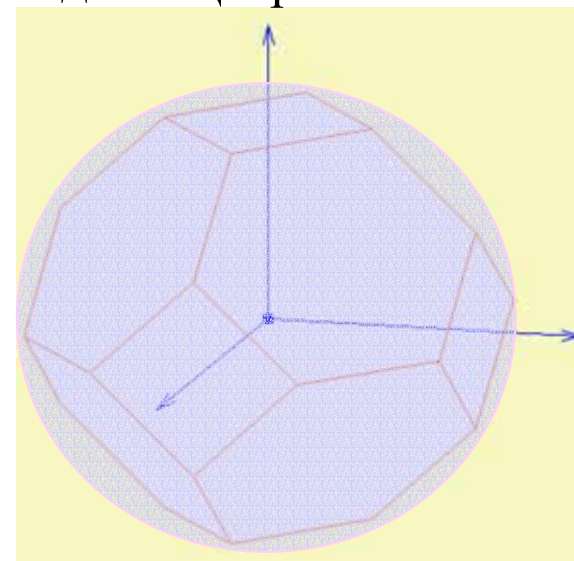


“структура алмаза”

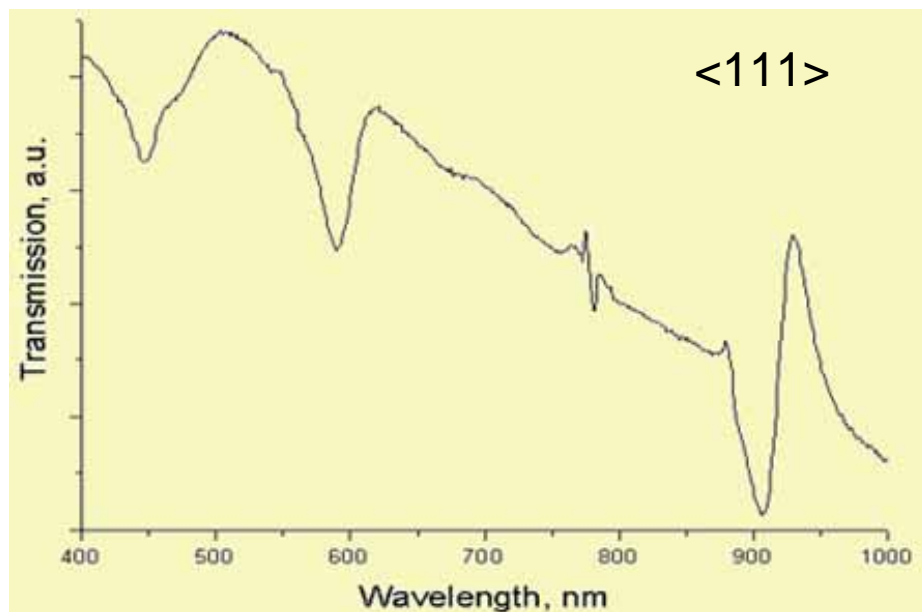


“обратный опал”

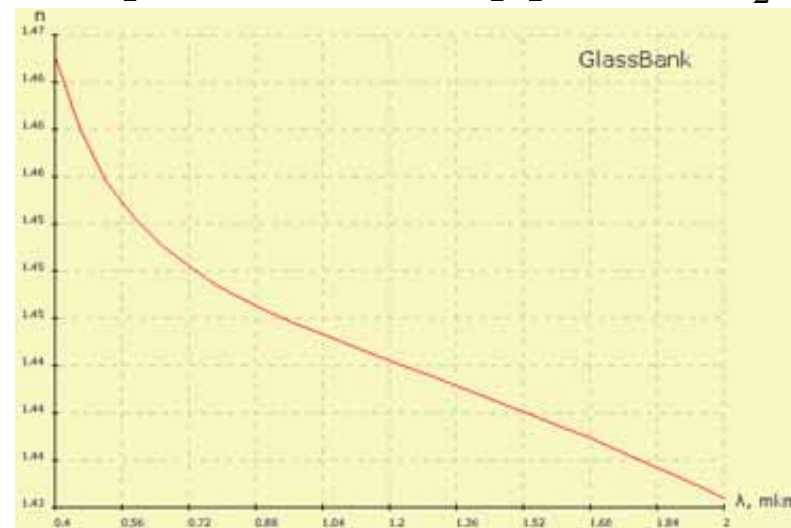
Первая зона Бриллюэна  
для ГЦК решетки:



# Оптические свойства



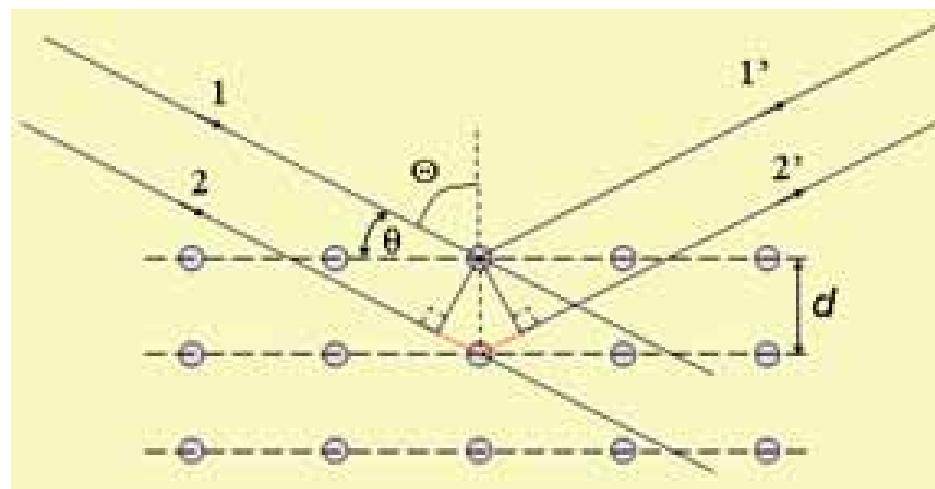
Дисперсия коэффициента преломления аморфного  $\text{SiO}_2$ :



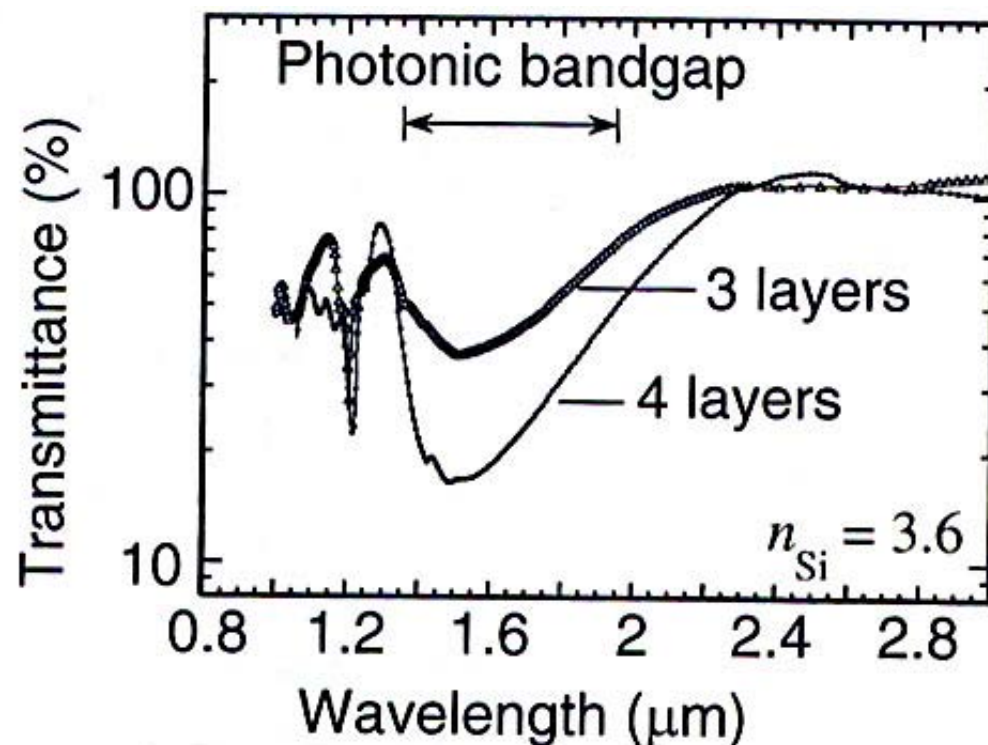
**Закон Брэгга-Вульфа:**

$$\lambda = \frac{2d}{k} \sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \Theta}$$

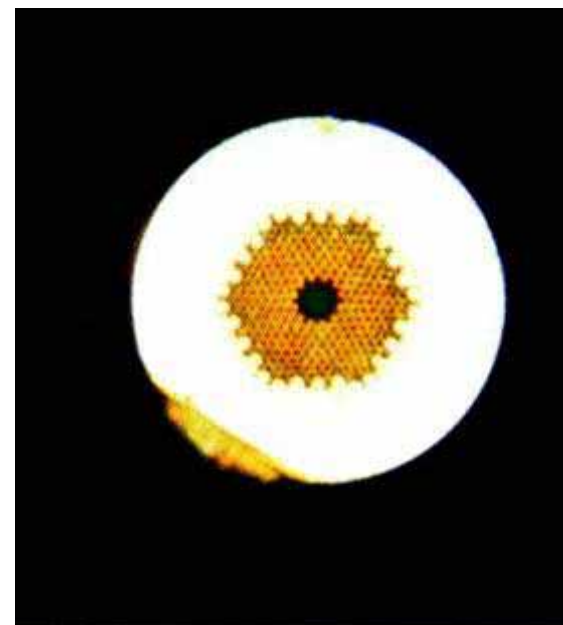
$$n = n_{\text{SiO}_2}(\lambda) \cdot f_{\text{SiO}_2} + n \cdot (1 - f_{\text{SiO}_2})$$



# Фотонные кристаллы (оптоволокно)



*Transmission spectra of a 3D photonic crystal for three- and four-layer thicknesses ( $n$  is the refractive index).*



*Optical micrograph of the output face of an air-core photonic-bandgap fiber illuminated at the input face using a white-light source. The core is surrounded by the photonic-crystal cladding, which is embedded within a pure silica jacket. The air core has an area of seven unit cells. The strongly colored light in the core is confined by the bandgap of the surrounding photonic crystal. The outer diameter of the fiber is 110  $\mu\text{m}$ .*



# Потенциальные применения



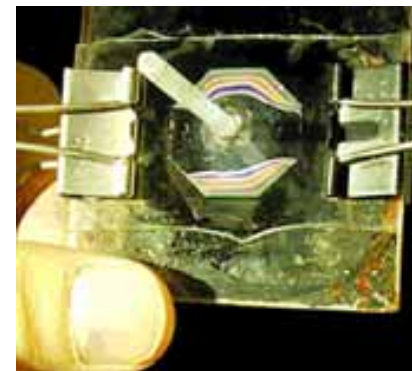
*Светодиоды  
(КПД ~ 50%)*



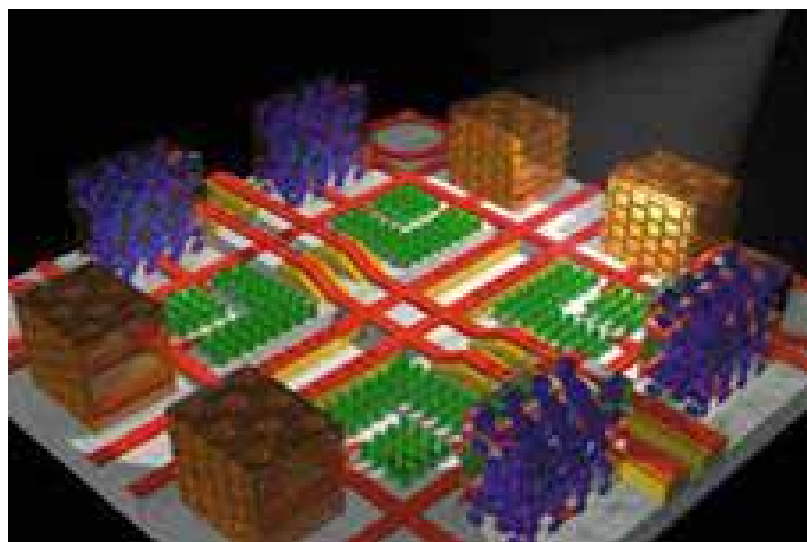
*Лазеры с низким  
порогом генерации*



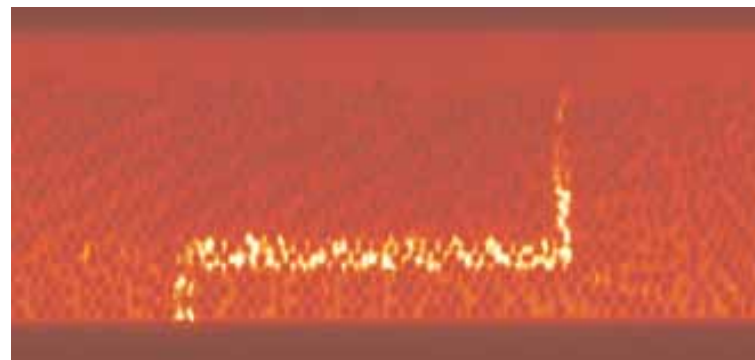
*Новые оптические  
волноводы*



*Устройства  
быстрого  
оптического  
переключения*



*Оптические устройства хранения и  
обработки информации, фотонные  
интегральные схемы*



*Оптические фильтры,  
микроустройства  
для направления света*



# Литература

- *Бахтизин Р.З.* Голубые диоды. // Соросовский образовательный журнал, Т.7, N3, 2001, с.75-83.
- *S.Nakamura.* III-V nitride based light-emitting devices. // Solid State Communications, Vol. 102, No.2-3, pp.237-248, 1997.
- *Artur B.Ellis et al.* Teaching General Chemistry: A Material Science Companion // American Chemical Society, Washington, DC, 1993.
- Полупроводниковые светоизлучающие структуры.  
<http://ofap.ulstu.ru/res/puevm/PAGE12.HTM>
- Новости науки за 6-12 мая 2002г.  
[http://www.nauka.lucksite.com/news\\_2705.html](http://www.nauka.lucksite.com/news_2705.html)
- Премия Киото - 2001  
[http://www.pacy.ru/print\\_ver.php3?id=228332](http://www.pacy.ru/print_ver.php3?id=228332)